

Metode Elektrokoagulasi Untuk Pengolahan Limbah Cair Laboratorium Yang Mengandung Logam-Logam Berat*Electrocoagulation Method For The Treatment Of Laboratory Wastewater Containing Heavy Metals*Marthen Joning¹, Lydia Melawaty¹, Rosalia Sira Sarungallo¹Program Studi Teknik Kimia¹

Fakultas Teknik

Universitas Kristen Indonesia Paulus Makassar

Email: joningmarthen@gmail.com

Abstrak

Dalam penelitian ini dilakukan beberapa variasi variabel proses seperti pH, waktu, dan tegangan untuk mengamati kondisi operasi yang lebih efektif dalam menurunkan polutan dalam air limbah. Sebelum proses elektrokoagulasi dilakukan karakterisasi awal pada limbah menggunakan metode analisis ICP-OES dan diperoleh hasil konsentrasi awal polutan seperti TSS = 119 mg/L, logam Besi (Fe) = 24,453 mg/L, Tembaga (Cu) = 9,732 mg/L, Timbal (Pb) = 0,309 mg/L dan Selenium (Se) = 0,052 mg/L. Karakterisasi polutan air limbah tersebut tidak memenuhi standar mutu limbah cair untuk dialirkan ke lingkungan berdasarkan PERMEN Lingkungan Hidup Nomor 05 Tahun 2014. Setelah melalui proses pengolahan dengan metode elektrokoagulasi, polutan padatan tersuspensi dan logam-logam tersebut dapat diturunkan konsentrasinya menjadi: TSS = 32 mg/L, logam Besi (Fe) = 0,003 mg/L, Tembaga (Cu) = 0,074 mg/L, Timbal (Pb) = 0,023 mg/L, dan Selenium (Se) hampir mendekati nol. Berdasarkan data-data konsentrasi polutan dalam limbah sebelum dan sesudah proses elektrokoagulasi tersebut, dapat dinyatakan bahwa metode elektrokoagulasi efektif menurunkan kadar polutan Total Suspended Solid (TSS) sebesar 73,12% , logam Besi (Fe) sebesar 99,99%, Tembaga (Cu) sebesar 99,24%, Timbal (Pb) sebesar 92,56%, Selenium (Se) sebesar 99,81%. Hasil tersebut diperoleh pada kondisi operasi yaitu tegangan 10 volt, waktu 10 menit dan pH 9. Metode elektrokoagulasi dihasilkan kualitas air limbah yang memenuhi syarat untuk dialirkan ke lingkungan berdasarkan standar baku mutu air limbah menurut PERMEN Lingkungan Hidup Nomor 05 Tahun 2014.

Kata kunci: elektrokoagulasi, elektrolisis, polutan, ICP OES**Abstract**

In this research several variations of process variables such as pH, time and voltage were carried out to observe operating conditions that were more effective in reducing pollutants in wastewater. Before the electrocoagulation process was carried out the initial characterization of the waste using the ICP-OES analysis method and obtained the results of the initial concentration of pollutants such as TSS = 119 mg / L, Iron metal (Fe) = 24,453 mg / L, Copper (Cu) = 9,732 mg / L, Lead (Pb) = 0.309 mg / L and Selenium (Se) = 0.052 mg / L. The characterization of the wastewater pollutants does not meet the quality standards of liquid waste to be flowed to the environment based on Environmental Ministerial Regulation No. 05 of 2014. After going through the processing process by electrocoagulation method, pollutants of suspended solids and metals can be reduced in concentration to: TSS = 32 mg / L, ferrous metal (Fe) = 0.003 mg / L, Copper (Cu) = 0.074 mg / L, Lead (Pb) = 0.023 mg / L, and Selenium (Se) almost close to zero. Based on the data of pollutant concentrations in waste before and after the electrocoagulation process, it can be stated that the electrocoagulation method is effective in reducing Total Suspended Solid (TSS) pollutant levels by 73.12%, Iron (Fe) metals by 99.99%, Copper (Cu) by 99.24%, Lead (Pb) by 92.56%, Selenium (Se) by 99.81%. The results were obtained under operating conditions at 10 volt voltage, 10 minutes time and pH 9. the electrocoagulation method produced the quality of wastewater that meets the requirements for drainage of the environment based on waste water quality standards according to the Environmental Ministerial Regulation No. 05 of 2014.

Keywords: *electrocoagulation, electrolysis, pollutant, ICP OES*

Pendahuluan

Kebutuhan pengolahan limbah sebelum di lepas kelingkungan diperlukan adanya *treatment* khusus yang sesuai dengan karakteristik limbah tersebut. Target produk pengolahan air limbah biasanya mengacu pada standar baku mutu air limbah atau layak buang ke lingkungan menurut Peraturan Pemerintah setempat dan atau PERMEN Lingkungan Hidup Nomor 05 tahun 2014.

Elektrokoagulasi merupakan proses koagulasi dengan menggunakan arus listrik searah melalui proses elektrolisis atau elektrokimia, di mana elektrodanya terbuat dari Aluminium dan Besi. Arus listrik membentuk sejumlah reaksi kimia tergantung pada jenis dan sifat elektroda serta media larutan. Pada proses elektrolisis akan terbentuk flok $\text{Al}(\text{OH})_3$ yang terjadi karena adanya pelepasan Al^{3+} dari plat elektroda (anoda) yang sanggup mengikat kontaminan dan partikel-partikel dalam limbah. Dengan demikian, kontaminan yang terikat akan terendapkan dan mudah untuk dihilangkan dengan cara pemisahan. Proses pengendapan terjadi dengan adanya proses koagulasi, dimana elektroda reaktif yang dipicu oleh arus listrik searah membentuk koagulan. Metode ini sudah banyak digunakan untuk pengolahan air limbah karena peralatan yang digunakan sederhana dan mudah dioperasikan bila dibandingkan dengan metode yang lain, tidak memerlukan tambahan bahan kimia yang dapat menghasilkan limbah yang baru, dan efisiensi pengolahan yang dihasilkan cukup tinggi.

Teknologi elektrokoagulasi sangat baik digunakan untuk pengolahan air limbah laboratorium karena flokulan yang dihasilkan berasal dari air limbah laboratorium tersebut tanpa ada tambahan bahan campuran koagulan dari luar. Selain itu tidak terdapat potensi pencemaran lingkungan dari cecceran bahan kimia saat penyimpanan atau saat distribusi bahan kimia ke lokasi pengolahan limbah cair.

Berdasarkan uraian diatas maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana efektivitas penggunaan metode elektrokoagulasi dalam pengolahan limbah cair laboratorium yang mengandung logam-logam berat.
2. Bagaimana kualitas air yang dihasilkan dari proses pengolahan limbah cair laboratorium yang mengandung logam-logam berat dengan metode elektrokoagulasi memenuhi syarat untuk dialirkan ke lingkungan berdasarkan standar mutu air limbah pada PERMEN Lingkungan Hidup Nomor 05 tahun 2014.

Penelitian ini bertujuan untuk:

1. Mengetahui keefektifan metode elektrokoagulasi pada pengolahan air limbah laboratorium mengandung logam-logam berat yang efektif dan efisien tanpa menggunakan bahan flokulan-koagulan (bahan kimia).
2. Mengetahui kualitas air hasil dari pengolahan limbah cair yang mengandung logam berat dengan metode elektrokoagulasi memenuhi syarat untuk dialirkan ke lingkungan berdasarkan standar mutu air limbah menurut PERMEN Lingkungan Hidup Nomor 05 tahun 2014.

Teori

Limbah merupakan buangan yang kehadirannya pada suatu saat dan tempat tertentu tidak dikehendaki di lingkungan karena tidak mempunyai nilai ekonomi. Limbah terdiri dari zat atau bahan buangan yang dihasilkan proses produksi industri yang kehadirannya dapat menurunkan kualitas lingkungan. Limbah yang mengandung bahan polutan yang memiliki sifat racun dan berbahaya dikenal dengan limbah B3, yang dinyatakan sebagai bahan yang dalam jumlah relatif sedikit tetapi berpotensi untuk merusak lingkungan hidup dan sumber daya (Kristanto, 2004).

Limbah laboratorium berasal dari buangan hasil reaksi-reaksi berbagai larutan kimia berbahaya dalam suatu eksperimen. Larutan kimia tersebut diantaranya mengandung bahan-bahan kimia toksik dan logam-logam berat yang berbahaya bagi makhluk hidup dan lingkungan. Bahan-bahan kimia

merupakan bahan yang berbahaya dan memiliki resiko tinggi bila tercemar ke lingkungan, karena memiliki zat yang bersifat racun (toksik). Tidak hanya bahan-bahan kimia, akan tetapi dimiliki oleh logam-logam berat misalnya Fe, Hg, Cr, Pb, As, Cu, Se dan lainnya sehingga aliran buangan limbah laboratorium akan membahayakan lingkungan dan makhluk hidup disekitarnya bila tidak dilakukan pengolahan limbah terlebih dahulu.

Sebelum air limbah yang sudah diolah dialirkan ke lingkungan, maka perlu adanya suatu standar tentang mutu air limbah yang diatur oleh Pemerintah Daerah setempat atau mengacu pada Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Republik Indonesia Nomor 05 Tahun 2014 tentang Baku Mutu Air Limbah. Adapun baku mutu air limbah bagi usaha dan/atau kegiatan yang belum memiliki baku mutu air limbah yang ditetapkan:

Tabel 1 Standar Mutu Baku Air Limbah

Parameter	Satuan	Golongan	
		I	II
Temperatur	°C	38	40
Zat Padat Suspensi (TSS)	mg/L	200	400
pH	-	6,0-9,0	6,0-9,0
Besi Terlarut (Fe)	mg/L	5	10
Mangan (Mn)	mg/L	2	5
Barium (Ba)	mg/L	2	3
Tembaga (Cu)	mg/L	2	3
Seng (Zn)	mg/L	5	10
Krom Total (Cr)	mg/L	0,5	1
Cadmium (Cd)	mg/L	0,05	1
Air Raksa (Hg)	mg/L	0,002	0,005
Timbal (Pb)	mg/L	0,1	1
Arsen (As)	mg/L	0,1	0,5
Selenium (Se)	mg/L	0,05	0,5
Nikel (Ni)	mg/L	0,2	0,5
Kobalt (Co)	mg/L	0,4	0,6

Elektrokoagulasi merupakan teknik pengolahan limbah cair anorganik dengan konsep dasar elektrokimia. Elektrokimia adalah peristiwa kimia (reaksi kimia) yang berhubungan dengan energi listrik. Prinsip dasar reaksi pada elektrokimia adalah reaksi reduksi dan oksidasi (*redoks*), dimana reaksi tersebut terjadi pada suatu sistem sel elektrokimia. Ada dua jenis sel elektrokimia yaitu: galvanis dan elektrolisis.

Sel galvanis dan sel elektrolisis adalah inti dari suatu proses elektrokimia. Sel galvanis menghasilkan energi yang disebabkan oleh hasil reaksi kimia, sedangkan sel elektrolisis dibutuhkan energi listrik untuk melangsungkan reaksi kimia. Pada sel galvanis arus listrik yang dialirkan melalui katoda mengakibatkan terjadinya proses aliran elektron dari elektroda negatif ke elektroda positif dengan melewati media elektrolit yang berfungsi sebagai penghantar arus listrik sehingga reaksi yang terjadi secara spontan. Pada sel elektrolisis arus listrik yang dialirkan melalui anoda mengakibatkan terjadinya suatu pelarutan material pada anoda menghasilkan kation logam (M^+).

Proses pengolahan limbah dengan metode elektokoagulasi menggunakan prinsip elektrokimia jenis sel elektrolisis. Pada sel elektrolisis berlaku Hukum Faraday yang menyatakan bahwa: Berat logam yang terelektrolisis dipermukaan katoda (w) sebanding dengan jumlah muatan yang dilewatkan (q , *Coulomb*) yang sebanding dengan kuat arus (I , *Ampere*) dikali waktu (t , detik), untuk jumlah muatan (It) berat logam yang terelektrolisis sebanding dengan ekuivalan massa Molar logam tersebut (M/nF). Hukum Faraday mengenai elektrolisis diatas dapat dirumuskan dengan persamaan sebagai berikut:

$$w = \frac{M.I.t}{96500.n.e}$$

- Ket. w : Berat logam terlarut (g)
 M : Massa atom relatif (g/mol)
 I : Arus (Ampere)
 n : Valensi logam
 t : Waktu (detik)

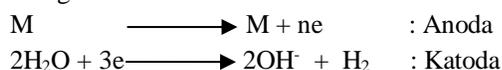
(Newman, J.S., 1984)

Pada umumnya, proses elektrokoagulasi terjadi karena transfer elektron dari satu elektroda ke elektroda lainnya, di mana aliran listrik yang disediakan oleh tegangan dialirkan di antara dua elektroda. Pada proses elektrokoagulasi tegangan yang biasa digunakan antara 0-60 V. Selain proses elektrokimia, pada proses elektrokoagulasi juga terjadi flotasi elektrolitik, karena gas yang terbentuk di katoda berupa gas hidrogen akan membuat aluminium hidroksida kompleks (Al(OH)₃) yang terbentuk akan mengikat kontaminan dalam air limbah.

Hidroksida kompleks yang mengikat kontaminan membentuk flok. Adanya gas hidrogen menyebabkan flok yang terbentuk terangkat ke permukaan reaktor. Proses berjalan secara terus-menerus secara simultan sehingga seiring berjalannya waktu, flok yang terbentuk akan semakin banyak dan saling bertumbukan. Tumbukan antar-flok menyebabkan berat jenis flok meningkat sehingga sebagian akan jatuh ke dasar reaktor dalam bentuk *sludge* (Ridantami V., dkk, 2016).

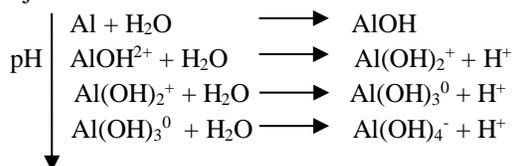
Gambar 1 Proses Elektrokoagulasi (Ridantami V., dkk, 2016)

Apabila arus listrik dilewatkan ke elektroda logam maka akan mengoksidasi logam (M) tersebut menjadi logam kation (M⁺), sedangkan air akan mengalami reduksi menghasilkan gas hidrogen (H₂) dan ion hidroksi (OH⁻). Persamaan reaksinya adalah sebagai berikut:



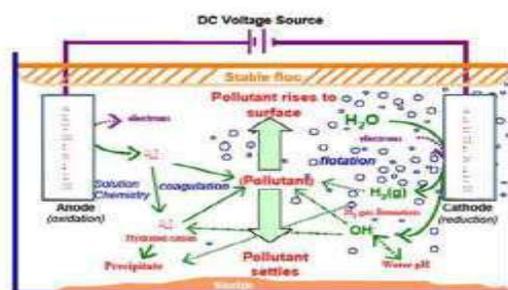
Kation menghidrolisis didalam air membentuk sebuah hidroksi dengan spesies dominan yang tergantung pada kondisi pH larutan.

Untuk kasus anoda aluminium maka reaksi yang terjadi adalah:



(Huheey, J.E. 1978)

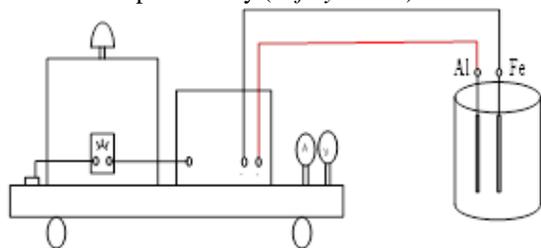
Inductively Coupled Plasma (ICP) yang termasuk ke dalam Spektroskopi Atomik adalah sebuah teknik analisis yang digunakan untuk mendeteksi jejak logam dalam sampel dan untuk mendapatkan karakteristik unsur-unsur yang memancarkan gelombang tertentu. *Inductively Coupled Plasma (ICP)* merupakan instrumen yang digunakan untuk menganalisis kadar unsur-unsur logam dari suatu sampel dengan menggunakan metode spektrofotometer emisi. Spektrofotometer emisi adalah metode analisis yang didasarkan pada pengukuran intensitas emisi pada panjang gelombang yang khas untuk setiap unsur. Bahan yang akan dianalisis untuk alat ICP ini harus berwujud larutan yang homogen. Ada sekitar 80 unsur yang dapat dianalisa dengan menggunakan alat ini



Metode Penelitian

1. Alat:
 - Elektogravimetric Methode (EGM)
 - Gelas Piala (*Beaker Glass*) 300 ml
 - Neraca Analitik
 - pH meter
 - Katoda Fe
 - Anoda Al
 - ICP
 - Oven
 - Corong pisah
 - Pengaduk
 - Pipet tetes
 - Labu semprot
 - Gegep
 - Kertas Saring No. 6 (*Filter Paper Whatman diameter 125 mm*)

- Alat pelindung diri (*personal protective equipment*):
- Sarung Tangan (*Gloves*)
- Kacamata pelindung (*Safety Glasses*)
- Baju Laboratorium
- Masker 3M (M 7502)
- Sepatu Safety (*Safety Shoes*)



Gambar 2 Peralatan Elektrokoagulasi dengan elektroda Aluminium dan Besi

2. Bahan:
 - Air Limbah
 - NaOH
 - HCl
 - Aquadest
3. Kondisi Operasi:
 - Variabel Bebas:
 - Tegangan Listrik (Volt) 5, 10
 - pH 7, 8, dan 9
 - Waktu (menit) 5, 10
 - Variabel Kendali:
 - Jenis Anoda (Al) dan Katoda (Fe)
 - Sumber air limbah (dari bak equalisasi IPAL).
 - Variabel tergantung
 - Logam-logam berat

4. Prosedur Tahapan Penelitian

Tahapan penelitian yang dilakukan meliputi Pengambilan sampel, pembacaan awal limbah cair sebelum diolah dengan menggunakan ICP, pengukuran dan penyesuaian pH, elektrokoagulasi dengan cara elektrolisis menggunakan Al sebagai Anoda (+) dan Fe sebagai Katoda (-), pemisahan cairan dengan endapan, penyaringan cairan dengan kertas saring (cairan tampung untuk mengetahui logam-logam berat yang masih larut dalam cairan

dengan menggunakan ICP, sisa saringan untuk mengetahui *Total Suspended Solid* (TSS) dan pelarutan kembali endapan yang terbentuk untuk mengetahui polutan logam-logam berat yang mengendap.

5. Pengambilan Sampel

Pengambilan sampel yang digunakan untuk proses penelitian diambil dari bak equalisasi IPAL (bak penampungan), untuk mengetahui kualitas air limbah dilakukan pengambilan dengan tiga titik didalam bak penampungan yang kemudian dimasukkan kedalam satu wadah dan dihomogenkan.

6. Pegujian Awal

Limbah cair yang sudah diambil dan dihomogenkan dilakukan pengujian awal untuk mengetahui seberapa besar kandungan logam-logam berat yang terdapat dalam limbah cair dengan menggunakan ICP. Limbah cair dimasukkan kedalam tabung plastik yang kemudian diletakkan pada wadah dan tempat yang sudah disediakan. Alat ICP dinyalakan kemudian dilakukan tahapan sesuai dengan instruksi kerja alat ICP tersebut. Buat deret standar sesuai yang diinginkan dan lakukan kalibrasi ICP dengan menggunakan larutan standar Mn 5 ppm. Pembacaan larutan deret standar kemudian dilanjutkan dengan pembacaan sampel.

7. pH atau Derajat Keasaman

Sejumlah limbah diukur derajat keasaman atau pHnya terlebih dahulu sebelum dilakukan proses pengolahan dengan menggunakan pH meter. Dilakukan proses kalibrasi pH meter terlebih dahulu pada pH 4, pH 7 dan pH 10 sebelum digunakan. Kemudian sampel limbah dimasukkan kedalam *beaker glass* sebanyak 100 ml. Sampel diukur dengan cara elektroda dicelupkan langsung kedalam sampel yang akan diukur, lalu angka akan muncul dengan sistem digital yang merupakan nilai pH sampel tersebut.

8. Suhu atau Temperatur

Sampel limbah dimasukkan kedalam *beaker glass* sebanyak 100 ml. Kemudian thermometer dicelupkan kedalam *beaker glass* yang berisi sampel,

lalu diukur suhu atau temperatur dengan melakukan pengamatan pada thermometer yang digunakan.

9. Metode Elektrokoagulasi

Sampel limbah cair dimasukkan kedalam *beaker glass* 300 ml sebanyak 300 ml. Dibuat beberapa variasi pH (7, 8, 9), waktu (5 menit, dan 10 menit), dan tegangan yang diberikan (5 volt, dan 10 Volt). Lalu pasang katoda Fe dan anoda Al pada alat elektrokoagulasi. Kemudian dinyalakan alat elektrokoagulasi dan *beaker glass* yang berisi sampel limbah cair di letakkan pada tempat yang telah disediakan. Dilakukan berulang-ulang sesuai dengan variasi yang sudah ditentukan.

10. Total Padatan / TSS (Total Suspended Solid)

Kertas saring Whatman dengan diameter 125 mm (Nomor 6) di oven pada suhu 103°C – 105°C selama 5 menit kemudian didinginkan dalam desikator dan ditimbang untuk memperoleh massa awal. Lalu 100 ml limbah cair disaring dengan menggunakan kertas saring Whatman dengan diameter 125 mm (Nomor 6) yang telah diperoleh massa awalnya. Selanjutnya kertas saring tersebut di oven pada suhu 103°C – 105°C selama 15 menit kemudian didinginkan dalam desikator dan ditimbang massanya. Diperoleh massa padatan terlarut tersuspensi dari hasil pengurangan massa kertas saring Whatman akhir setelah penyaringan sampel dengan massa kertas saring Whatman awal.

11. Kadar Logam Berat dengan ICP-OES

Penentuan kadar logam-logam berat baik sebelum maupun sesudah dilakukan proses pengolahan menggunakan ICP-OES. Sampel limbah dimasukkan kedalam *beaker glass* sebanyak 100 ml. Kemudian ditunggu beberapa jam hingga padatan terlarut mengendap. Selanjutnya air limbah pada bagian atas disaring dengan menggunakan kertas saring whatman diameter 125 mm (Nomor 6) lalu dimasukkan kedalam botol plastik. ICP-OES

dinyalakan dan dilakukan kalibrasi alat dengan menggunakan larutan standar Mn 5 ppm dan dilanjutkan dengan pembacaan deret standar sesuai dengan jumlah parameter yang ada dalam larutan standar tersebut. Kemudian sampel hasil saringan tersebut dibaca dan hasilnya akan muncul pada monitor.

Hasil

1. Karakterisasi Air Limbah

Analisa awal karakterisasi air limbah dilakukan untuk memperoleh data kuantitas dari variabel-variabel yang diamati dalam penelitian. Variabel-variabel pengamatan dalam penelitian ini adalah sesuai yang ada dalam **Tabel 2**. Data kuantitas dari masing-masing variabel penelitian sebelum proses digunakan untuk mengukur efektivitas penurunan polutan setelah dilakukan proses pengolahan elektrokoagulasi pada limbah cair anorganik. Metode analisa dilakukan secara triplo dan dari hasil analisa diperoleh data sebagai berikut:

Tabel 2 Kandungan polutan air limbah dari bak equalisasi sebelum diolah

No.	Parameter	Satuan	Contoh Uji Awal			Rata-rata
			I	II	III	
1	Temperatur	°C	31.9	31.9	31.9	31.9
2	Zat Padat Suspensi (TSS)	mg/L	119	119	118	119
3	pH	-	1.7	1.7	1.7	1.7
4	Besi Terlarut (Fe)	mg/L	22.887	25.166	25.305	24.453
5	Mangan (Mn)	mg/L	0.311	0.330	0.329	0.323
6	Barium (Ba)	mg/L	0.533	0.601	0.594	0.576
7	Tembaga (Cu)	mg/L	8.930	10.123	10.143	9.732
8	Seng (Zn)	mg/L	0.840	0.951	0.935	0.909
9	Krom Total (Cr)	mg/L	0.274	0.285	0.283	0.280
10	Cadmium (Cd)	mg/L	0.016	0.005	-0.001	0.007
11	Air Raksa (Hg)	mg/L	0.043	-0.003	-0.049	-0.003
12	Timbal (Pb)	mg/L	0.340	0.261	0.326	0.309
14	Arsen (As)	mg/L	0.038	0.022	0.035	0.032
15	Selenium (Se)	mg/L	0.079	-0.043	0.121	0.052
16	Nikel (Ni)	mg/L	0.195	0.190	0.168	0.184
17	Kobalt (Co)	mg/L	0.026	0.018	0.016	0.020

Power of Hydrogen (pH) adalah derajat keasaman yang digunakan untuk menyatakan tingkat keasaman atau kebasahan yang dimiliki oleh suatu larutan. Didalam pengendalian limbah cair laboratorium semakin rendah nilai keasaman suatu limbah maka semakin berbahaya bagi lingkungan. Dari hasil analisa awal sampel seperti pada **Tabel 2** terlihat bahwa pH limbah cair anorganik pada IPAL sangat rendah yaitu pada rata-rata 1,7. Besaran ini sangat jauh dibawah nilai pH standar mutu air limbah yang dapat dialirkan ke lingkungan menurut PERMEN Lingkungan Hidup Nomor 05 Tahun 2014 yang harus berada pada kisaran 6,0 sampai dengan 9,0. *Total Suspended Solid* (TSS) yang biasa disebut juga Total Padatan yang Tersuspensi merupakan faktor penting yang akan mudah dikenali dalam mengukur kualitas suatu air karena secara fisik dapat dilihat, jika suatu air limbah mengandung TSS tinggi maka dapat langsung disimpulkan bahwa limbah berkualitas jelek dan berpotensi merusak ekosistem khususnya di akuatik. Berdasarkan analisa awal kadar logam berat pada limbah cair anorganik diperoleh hasil bahwa terdapat beberapa logam berat yang kadarnya terlalu tinggi dan tidak memenuhi standar mutu air limbah menurut PERMEN Lingkungan Hidup nomor 05 tahun 2014 yaitu: Besi

(Fe) dengan kadar rata-rata 24.453 mg/L (standar mutu adalah 5 mg/L), Tembaga (Cu) 9.732 mg/L (standar mutu adalah 2 mg/L), Timbal (Pb) 0.309 mg/L (standar mutu adalah 0.1 mg/L), Selenium (Se) 0.052 mg/L (standar mutu adalah 0.05 mg/L). Oleh sebab itu merupakan keharusan untuk melakukan pengolahan sebelum dibuang ke lingkungan agar tidak terjadi pencemaran bagi lingkungan dan akuatik disekitarnya. Melihat kualitas air limbah terkontaminasi dengan polutan yang mencemari lingkungan maka dalam penelitian ini diterapkan teknologi metode elektrokoagulasi dalam proses pengolahan karena disamping dapat menurunkan TSS melalui proses pembentukan koagulan juga terjadi adsorpsi terhadap logam-logam berat terlarut cairan dan menaikkan nilai pH.

2. Penurunan Kandungan Polutan pada Kondisi Operasi.

Untuk mengetahui lebih lanjut variabel-variabel bebas serta sifat-sifat penurunan kandungan polutan untuk setiap perubahan nilai variabel bebas maka dilakukan percobaan ini sehingga akan menghasilkan penurunan kandungan zat pencemar hingga memenuhi standar baku mutu yang dipersyaratkan dalam PERMEN Lingkungan Hidup

nomor 05 tahun 2014 sebagai salah satu tolok ukur keberhasilan sistem pengolahan yang digunakan sehingga kondisi operasi (Tegangan, pH, dan waktu). Sampel sebagai penghasil data ini, diambil dari tiga

titik yang berbeda sehingga diharapkan dapat mewakili dari keseluruhan volume limbah cair yang ada didalam bak equalisasi. Data hasil penelitian secara rinci dapat dilihat pada **Tabel 3** berikut:

Tabel 3 Hasil Penelitian air limbah untuk parameter non logam

No.	pH	Awal		Waktu (Menit)	Tegangan Volt	Akhir		TSS (mg/L)	
		pH	Temp. (°C)			pH	Temp. (°C)	Awal	Akhir
1	7	7.1	33.1	5	5	6.9	30.6	119	68
2		7.0	33.1	5	10	6.8	31.1	119	66
3		7.1	32.9	10	5	7.0	31.3	119	64
4		7.0	33.0	10	10	7.1	31.3	119	63
5	8	8.1	33.0	5	5	7.1	31.4	119	48
6		8.3	33.0	5	10	7.3	31.4	119	46
7		8.2	33.4	10	5	7.2	31.3	119	45
8		8.1	33.3	10	10	7.4	31.4	119	43
9	9	9.1	33.6	5	5	7.7	31.5	119	38
10		9.1	33.1	5	10	7.9	31.5	119	35
11		9.0	33.3	10	5	7.7	31.5	119	34
12		9.0	33.3	10	10	7.9	31.5	119	32
Standar Mutu Air Limbah:						6.0-9.0	38		200

Total Suspended Solid (TSS) mengalami penurunan setelah dilakukan proses pengolahan limbah cair dengan menggunakan metode elektrokoagulasi adalah 73,12%, apabila dibandingkan dengan penelitian sebelumnya yaitu dengan menggunakan metode koagulasi dan adsorpsi dapat menurunkan TSS sebesar 69,13% (Azamia M., 2012), dan untuk penelitian pengolahan limbah industri berbasis logam dengan teknologi elektrokoagulasi flotasi dapat menurunkan TSS sebesar 71% (Mukimin A., 2006).

Tabel 4 Hasil Penelitian air limbah untuk logam berat Fe, Mn, Ba, Cu, Zn, Cr, Cd

No.	pH	Waktu (Menit)	Tegangan Volt	Parameter Logam-Logam Berat (mg/L)						
				Fe	Mn	Ba	Cu	Zn	Cr	Cd
1	1.7	0	0	24.453	0.323	0.576	9.732	0.909	0.280	0.007
2	6.9	5	5	0.050	0.151	0.477	0.653	0.096	0.003	-0.004
3	6.8	5	10	0.023	0.066	0.368	0.105	0.061	0.006	0.003
4	7.0	10	5	0.013	0.051	0.381	0.097	0.067	0.004	0.001
5	7.1	10	10	0.014	0.029	0.317	0.059	0.107	0.004	0.001
6	7.1	5	5	0.175	0.088	0.374	0.787	0.078	0.007	0.000

7	7.3	5	10	0.009	0.026	0.316	0.131	0.053	0.003	0.001
8	7.2	10	5	0.009	0.024	0.328	0.102	0.063	0.002	-0.002
9	7.4	10	10	0.007	0.021	0.308	0.058	0.052	0.005	-0.002
10	7.7	5	5	0.008	0.010	0.273	0.611	0.066	0.004	0.000
11	7.9	5	10	0.002	0.004	0.218	0.077	0.101	0.000	-0.002
12	7.7	10	5	0.004	0.010	0.275	0.324	0.063	0.002	0.000
13	7.9	10	10	0.003	0.005	0.283	0.074	0.022	0.000	-0.005
Standar Mutu Air Limbah:				5	2	2	2	5	0.5	0.05

Logam-logam yang terkandung dalam limbah cair yang melebihi baku mutu PERMEN Lingkungan Hidup nomor 05 Tahun 2014, setelah dilakukan proses pengolahan dengan menggunakan metode elektrokoagulasi sudah memenuhi atau berada dibawah nilai standar baku mutu yang dipersyaratkan yaitu logam Besi (Fe) mengalami penurunan sebesar 99,99% dan Tembaga (Cu) mengalami penurunan sebesar 99,24% bila dibandingkan dengan nilai awal atau sebelum dilakukan proses pengolahan menggunakan metode elektrokoagulasi. Menurut Azamia M. (2012) tentang pengolahan limbah dengan menggunakan metode Koagulasi mampu menurunkan logam Fe sebesar 85,53%, Mn sebesar 55,84%, Cr sebesar 43,07%. Sedangkan dengan metode Presipitasi dan Adsorpsi mengalami penurunan Cu sebesar 97,54%, Cd sebesar 93,48%, Zn sebesar 91,58% (Adli H.,

2012). Dengan metode elektrokoagulasi menggunakan alat jartest mengalami penurunan logam Fe sebesar 95% (Anzar E., 2018).

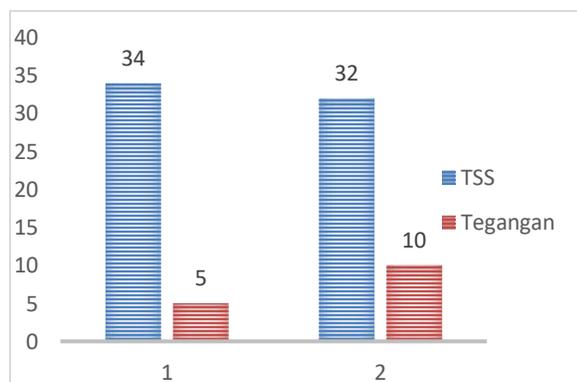
Tabel 5 Hasil Penelitian Air Limbah untuk logam berat Hg, Pb, As, Se, Ni, Co

No.	pH	Waktu Tegangan		Parameter Logam-Logam Berat (mg/L)					
		(Menit)	Volt	Hg	Pb	As	Se	Ni	Co
1	1.7	0	0	-0.003	0.309	0.032	0.052	0.184	0.020
2	6.9	5	5	-0.055	-0.001	0.007	-0.081	0.022	0.003
3	6.8	5	10	<0.002	-0.025	0.010	-0.016	0.004	0.004
4	7.0	10	5	-0.017	0.009	0.009	<0.05	-0.005	0.005
5	7.1	10	10	<0.002	0.033	0.010	-0.143	-0.005	-0.002
6	7.1	5	5	-0.008	0.006	0.012	-0.085	0.030	0.002
7	7.3	5	10	-0.034	-0.001	-0.004	<0.05	-0.007	-0.001
8	7.2	10	5	-0.022	-0.029	0.011	-0.120	-0.002	-0.002
9	7.4	10	10	-0.046	-0.028	0.004	-0.064	0.006	0.006
10	7.7	5	5	-0.005	-0.024	0.025	-0.084	0.002	0.002
11	7.9	5	10	-0.047	-0.020	0.014	-0.093	0.001	0.001
12	7.7	10	5	-0.052	-0.046	0.013	-0.041	-0.008	0.000

13	7.9	10	10	-0.070	0.023	0.006	-0.066	0.000	0.001
Standar Mutu Air Limbah:				0.002	0.1	0.1	0.05	0.2	0.4

Logam Fe dan logam Se sebelum diolah melebihi satandar baku mutu air limbah yang dipersyaratkan, dan setelah diolah dengan metode elektrokoagulasi sudah memenuhi atau nilainya berada dibawah nilai ambang batas yang dipersyaratkan, logam Timbal (Pb) mengalami penurunan sebesar 92,56%, logam Selenium (Se) mengalami penurunan 99,81%. Dengan teknologi elektrokoagulasi flotasi dapat menurunkan Pb sebesar 93%, Cr sebesar 99%, Zn sebesar 99%, Ni sebesar 99% (Mukimin A., 2006). Untuk metode Presipitasi dan Adsorpsi mengalami penurunan Pb sebesar 90,90%, Co sebesar 70,55% (Adli H., 2012). Dengan Adsorpsi dan Pretreatment Netralisasi dan Koagulasi penurunan logam Pb sebesar 93,5%, Cr sebesar 97% (Nurhayati I., dkk., 2018).

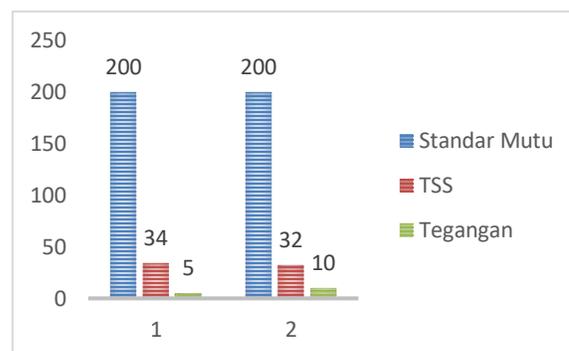
Untuk mengetahui hubungan atau korelasi tegangan sebagai salah satu variabel bebas yang dipilih terhadap konsentrasi zat pencemar (TSS), maka dibuat grafik dibawah ini:



Gambar 3 Konsentrasi Pencemar (TSS) sebagai fungsi Tegangan (pH 9, waktu 10 menit)

Terjadi penurunan kandungan atau konsentrasi polutan (TSS) setiap kenaikan Tegangan. Fenomena ini menunjukkan kesesuaian hasil penelitian dengan hukum Faraday, yaitu: kenaikan tegangan berbanding lurus dengan jumlah logam anoda sebagai sumber koagulan yang terlarutkan. Proses penurunan polutan terjadi melalui pembentukan koagulan $Al(OH)_x$ yang dihasilkan oleh

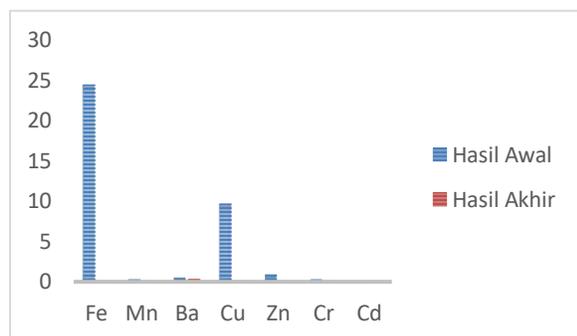
anoda Al dan ion OH^- yang berasal dari molekul H_2O . Koagulan $Al(OH)_x$ ini selanjutnya mengadsorpsi polutan-polutan yang ada didalam rongga molekulnya.



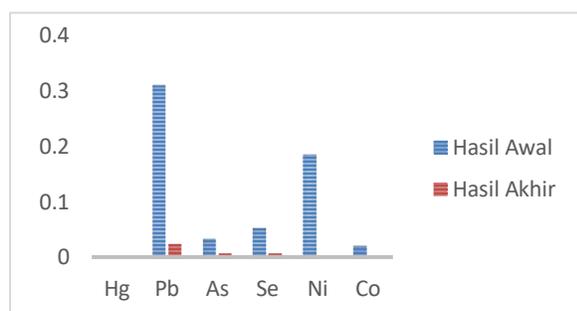
Gambar 4 Perbandingan antara standar mutu sebagai fungsi Tegangan (pH 9, waktu 10 menit)

Semakin tinggi tegangan yang dialirkan maka akan memberikan hasil kualitas air limbah terolah lebih baik dan memenuhi standar baku mutu air limbah yang dipersyaratkan menurut PERMEN Lingkungan Hidup Nomor 05 Tahun 2014. Menurut Gameissa, dkk. tentang pengolahan limbah cair industri pangan dengan teknik elektrokoagulasi menggunakan elektroda stainless steel dapat menurunkan TSS sebesar 88,02%, pH tertinggi 8,29 dan kombinasi terbaik dicapai pada tegangan 24 volt dan waktu kontak 60 menit (Gameissa W. M., dkk., 2012).

Untuk pencemar/polutan logam berat, korelasi terhadap tegangan yang dialirkan dapat dilihat pada grafik (**Gambar 5** dan **Gambar 6**) berikut:



Gambar 5 Konsentrasi polutan (Fe, Mn, Ba, Cu, Zn, Cr, Cd) sebagai fungsi Tegangan (pH 9, Waktu 10 menit).

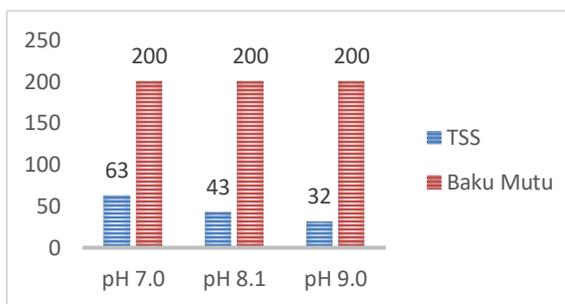


Gambar 6 Konsentarsi Polutan (Hg, Pb, As, Se, Ni, Co) sebagai fungsi Tegangan (pH 9, waktu 10 menit)

Proses penurunan polutan logam berat selain melalui pembentukan senyawa logam hidroksida $[M(OH)_x]$ yang tidak larut juga berasal dari proses pembentukan senyawa oksida logam kompleks (MAI_2O_4) (Huheey, J.E. 1978). Senyawa oksida logam kompleks ini tidak larut dalam air sehingga dapat teradsorpsi oleh koagulan $Al(OH)_x$ membentuk flok yang berinteraksi dengan gas H_2 yang terbentuk sehingga dihasilkan flok yang berdensitas rendah dan bergerak ke permukaan. Menurut Luqman, dkk. pengolahan limbah cair industri penyamakan kulit proses elektrokoagulasi mampu menurunkan kadar Khrom (Cr) hingga 1,76 ppm (atau penurunan kadar Khrom (Cr) sebesar 99,77%) di mana voltase optimal adalah sebesar 8 volt dan 6 volt untuk waktu proses masing-masing selama 2 jam dan 3 jam (R. S. Luqman, dkk., 2016). Efisiensi penurunan kontaminan terbaik pada pengolahan menurut Vemi dkk. diperoleh pada kondisi 12,5 volt dan waktu 60 menit untuk Uranium (U) dengan efisiensi sebesar 97,2%, dan Thorium (Th) pada kondisi 12,5

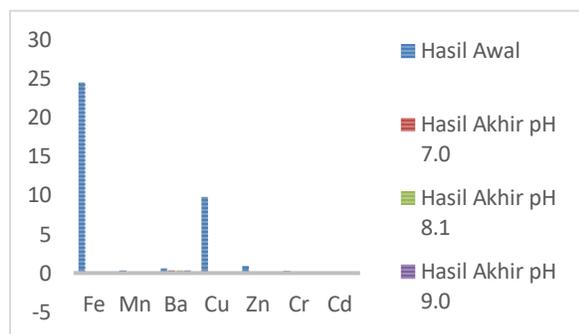
volt dan waktu 30 menit dengan efisiensi penurunan sebesar 99,6% (Ridantami V., dkk., 2016).

Variabel pH mempunyai konstribusi terhadap penurunan konsentrasi pencemar. Informasi ini kemudian ditindaklanjuti dengan menerapkan kondisi operasi pH 7, 8, dan 9. Alasan pemilihan nilai-nilai pH ini karena kisaran pH tersebut masih dalam batas yang di persyaratkan oleh baku mutu air limbah menurut PERMEN Lingkungan Hidup nomor 05 tahun 2014 sehingga apabila tidak terjadi perubahan pH akibat pengolahan maka tidak diperlukan netralisasi. Dengan demikian tidak ada penambahan atau komsumsi bahan untuk keperluan netralisasi.

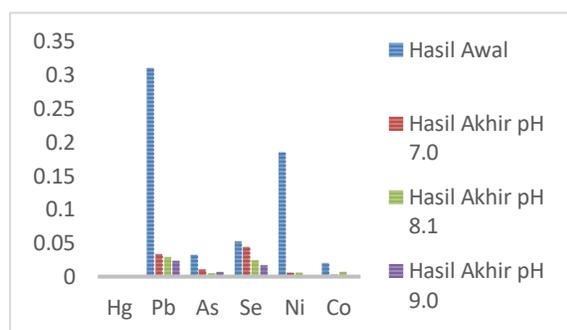


Gambar 7 Konsentrasi pencemar TSS sebagai fungsi pH (Tegangan 10 volt, waktu 10 menit)

Penurunan kandungan polutan hasil pengolahan dengan meningkatnya pH. Hal ini disebabkan oleh efek ion hidroksida (OH^-) , semakin meningkat jumlah ion hidroksida maka energi yang dibutuhkan untuk pembentukan gas hidrogen/oksigen semakin rendah sehingga gelembung hidrogen/oksigen banyak terbentuk. Meningkatnya jumlah gelembung udara akan mendorong flok yang terbentuk terangkat ke permukaan reaktor yang mengakibatkan flok yang terbentuk akan semakin banyak dan saling bertumbukan dan menyebabkan berat jenis flok meningkat sehingga sebagian akan jatuh ke dasar reaktor dalam bentuk *sludge* dengan membutuhkan waktu yang tidak terlalu lama. Secara kuantitas jumlah penurunan zat pencemar pada air limbah oleh efek pH adalah sangat besar sehingga pemanfaatan parameter ini untuk meningkatkan efisiensi pengolahan adalah tepat. Karena pH awal air limbah adalah 1,7 maka untuk menghilangkan komsumsi bahan kimia dalam pengaturan pH tidak dapat dihindari. Untuk tren/kecenderungan penurunan konsentrasi pencemar logam-logam berat dapat dilihat pada grafik (**Gambar 8** dan **Gambar 9**) berikut ini:



Gambar 8 Konsentrasi pencemar (Fe, Mn, Ba, Cu, Zn, Cr, Cd) sebagai fungsi pH (Tegangan 10 volt, waktu 10 menit)

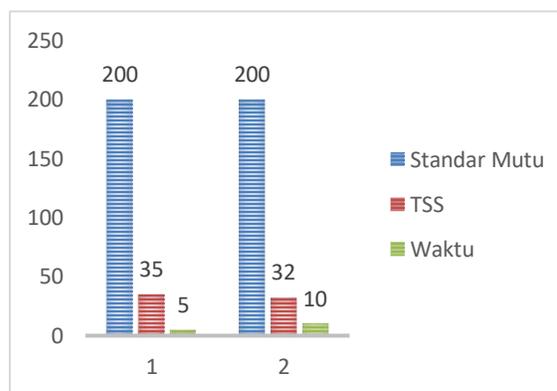


Gambar 9 Konsentrasi pencemar (Hg, Pb, As, Se, Ni, Co) sebagai fungsi pH (Tegangan 10 volt, waktu 10 menit)

Kontribusi pH pada penurunan polutan logam berat adalah pada ketersediaan ion hidroksi (OH^-). Semakin meningkat nilai pH maka reduksi molekul air (H_2O) menjadi ion hidroksi dan gas hidrogen adalah besar. Ion hidroksi akan bereaksi dengan polutan logam berat menjadi senyawa logam hidroksida yang tak larut dan mudah teradsorpsi oleh koagulan. Menurut Risanto, dkk. tentang pengolahan air kolam renang menggunakan metode elektrokoagulasi dengan elektroda aluminium-grafit bahwa tidak tepat menggunakan metode ini karena kandungan logam Al^{3+} semakin bertambah namun nilai pH air mengarah ke netral (Nugroho R. dan Suyanta, 2016).

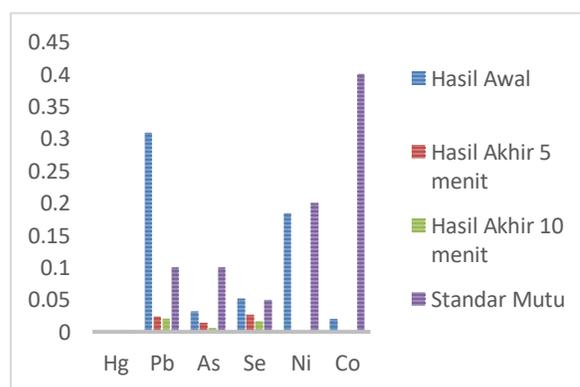
Variabel waktu bermanfaat untuk penentuan waktu untuk elektrokoagulasi. Semakin tinggi waktu yang digunakan maka semakin lama proses elektrokoagulasi terjadi dan proses pembentukan koagulan $\text{Al}(\text{OH})_3$ banyak dan terukur dengan kebutuhan limbah cair yang diolah untuk membentuk flok berpartikel besar dan mengendap. Semakin cepat waktu yang digunakan proses elektrokoagulasi maka

proses pembentukan koagulan $\text{Al}(\text{OH})_3$ sedikit dan tidak sesuai dengan kebutuhan limbah cair yang diolah dengan flok yang ukuran partikelnya kecil untuk membentuk flok yang ukuran partikelnya besar.

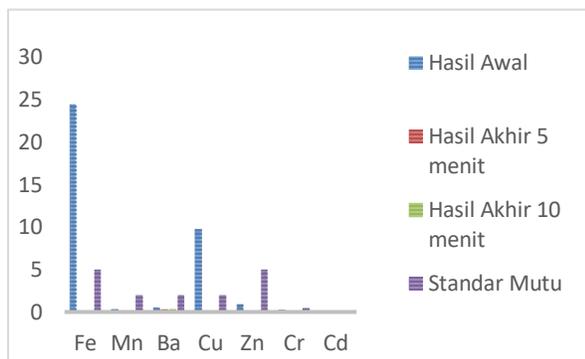


Gambar 10 Konsentrasi pencemar TSS sebagai fungsi Waktu (Tegangan 10 volt, pH 9)

Semakin lama waktu yang digunakan untuk proses elektrokoagulasi maka akan semakin banyak flok yang berpartikel kecil membentuk flok yang berpartikel besar membentuk *sludge* sehingga padatan yang terlarut (TSS) semakin kecil. Untuk tren/Kecenderungan penurunan konsentrasi pencemar pada *effluent* pengolahan dengan bertambahnya waktu dapat dilihat pada **Gambar 11** dan **Gambar 12** berikut:



Gambar 11 Konsentrasi Pencemar logam-logam berat (Fe, Mn, Ba, Cu, Zn, Cr, Cd) sebagai fungsi Waktu (Tegangan 10 Volt, pH 9)



Gambar 12 Konsentrasi Pencemar logam-logam berat (Hg, Pb, As, Se, Ni, Co) sebagai fungsi Waktu (Tegangan 10 Volt, pH 9).

Terjadinya penurunan konsentrasi pencemar pada *effluent* pengolahan dengan bertambahnya waktu. Hal ini dikarenakan semakin bertambahnya koagulan yang terbentuk dalam waktu yang lebih lama sehingga peluang transporasi polutan dan adsorpsi koagulan semakin tinggi. Menurut R. S. Luqman, dkk. tentang pengolahan limbah cair industri penyamakan kulit menggunakan proses elektrokoagulasi mampu menurunkan kadar krom (Cr) hingga 1,76 ppm (atau penurunan kadar krom sebesar 99,77%) dimana waktu optimal yang diperoleh selama 3 jam pada voltase 6 volt dan 8 volt (R. S. Luqman, dkk., 2016).

Efisiensi penurunan kontaminan terbaik pada pengolahan menurut Vemi, dkk. diperoleh pada waktu 60 menit dan kondisi 12,5 Volt untuk Uranium (U) dengan efisiensi sebesar sebesar 97,2%, dan Thorium (Th) pada waktu 30 menit dan kondisi 12,5 Volt dengan efisiensi penurunan sebesar 99,6% (Ridantami V., dkk., 2016).

Kesimpulan

1. Penerapan metode elektrokoagulasi dalam pengolahan limbah cair laboratorium yang mengandung polutan seperti padatan tersuspensi dan logam-logam berat sangat efektif dimana dalam penelitian ini konsentrasi awal polutan seperti TSS = 119 mg/L, logam Besi (Fe) = 24,453 mg/L, Tembaga (Cu) = 9,732 mg/L, Timbal (Pb) = 0,309 mg/L dan Selenium (Se) = 0,052 mg/L. Karakterisasi polutan air limbah tersebut tidak memenuhi standar mutu limbah cair untuk dialirkan ke lingkungan berdasarkan

PERMEN Lingkungan Hidup Nomor 05 Tahun 2014. Setelah melalui proses pengolahan dengan metode elektrokoagulasi, polutan padatan tersuspensi dan logam-logam tersebut dapat diturunkan konsentrasinya menjadi: TSS = 32 mg/L, logam Besi (Fe) = 0,003 mg/L, Tembaga (Cu) = 0,074 mg/L, Timbal (Pb) = 0,023 mg/L, dan Selenium (Se) hampir mendekati nol. Berdasarkan data-data konsentrasi polutan dalam limbah sebelum dan sesudah proses elektrokoagulasi tersebut, dapat dinyatakan bahwa metode elektrokoagulasi mampu menurunkan kadar polutan *Total Suspended Solid* (TSS) sebesar 73,12% , logam Besi (Fe) sebesar 99,99%, Tembaga (Cu) sebesar 99,24%, Timbal (Pb) sebesar 92,56%, Selenium (Se) sebesar 99,81%. Hasil tersebut diperoleh pada kondisi operasi yaitu tegangan 10 volt, waktu 10 menit dan pH 9.

2. Dari hasil penelitian pengolahan air limbah laboratorium dengan metode elektrokoagulasi ini dihasilkan kualitas atau mutu air limbah yang memenuhi syarat untuk dialirkan ke lingkungan berdasarkan standar baku mutu air limbah menurut PERMEN Lingkungan Hidup Nomor 05 Tahun 2014.

Ucapan Terima Kasih

Pada kesempatan ini dengan kerendahan hati penulis ingin mengucapkan banyak terima kasih kepada:

1. Ibu Dr. Lydia Melawaty, M.Si dan Ibu Rosalia Sira Sarungallo S.T., M.T. selaku dosen pembimbing.
2. Ibu Rosalia Sira Sarungallo S.T., M.T. selaku Ketua Program Studi Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Kristen Indonesia Paulus Makassar.
3. Prof.Dr.Ir. Tjodi Harlim yang telah memberikan pengetahuan yang mendasar tentang Teknik Kimia.
4. Segenap Dosen Program Studi Teknik Kimia UKI Paulus Makassar yang telah memberikan ilmunya kepada penulis.

5. Bapak Muhamad Surahman, S.E., M.M. selaku Kepala Cabang PT SUCOFINDO (Persero) Cabang Timika yang telah memberikan izin untuk melaksanakan penelitian di Laboratorium PT SUCOFINDO (Persero) Cabang Timika.
 6. Bapak Ary Surya Purnama, S.Mn., M.M. selaku Kepala Bidang Inspeksi dan Pengujian PT SUCOFINDO (Persero) Cabang Timika yang banyak memberikan saran dan kritik selama penelitian berlangsung.
 7. Seluruh karyawan dan karyawan PT SUCOFINDO (Persero) Cabang Timika tak terkecuali yang telah membantu menyelesaikan penelitian ini.
 8. Kakak-kakak Senior dan Alumni Teknik Kimia atas saran dan bantuannya.
 9. Anne Sipora Rante Patandianan, Leonel Christian, Kayla Zefanya, dan Adriel Nathanael tercinta yang turut mendoakan dan memberikan dukungan secara moril maupun materi.
 10. Orang tua, saudara-saudari, atas doa, bimbingan, serta kasih sayang yang selalu tercurah selama ini.
- Daftar Pustaka**
- Adli H., 2012. *Pengolahan Limbah Cair Laboratorium dengan Metode Presipitasi dan Adsorpsi*, Universitas Indonesia, Depok
- Anzar E., 2018. *Pengolahan Limbah Cair dengan Metode Elektrokoagulasi Menggunakan Alat Jartest Untuk Menurunkan Kadar Logam Fe pada Laboratorium Pengendalian Pencemaran*, Laboratorium Pencemaran Politeknik Negeri Sriwijaya, Palembang
- Azamia M., 2012, *Jurnal Pengolahan Limbah Cair Laboratorium Kimia Dalam Penurunan Kadar Fe, Mn, Cr Dengan Metode Koagulasi dan Adsorpsi*, Universitas Indonesia, Depok
- Gameissa W. M., Suprihatin, dan Indrasti S. N., 2012, *Pengolahan Tersier Limbah Cair Industri Pangan dengan Teknik Elektrokoagulasi Menggunakan Elektroda Stainless Steel*, Institut Pertanian Bogor, Jawa Barat, Indonesia
- Inductively Coupled Plasma (ICP), (Diakses: Sabtu, 19 Oktober 2019, pukul 21.30 WIT), Tersedia di: <https://haiyulfadhli.blogspot.com/2015/04/inductively-coupled-plasma-icp.html>
- Kristianto, 2004, *Ekologi Industri*, Yogyakarta: Andi.
- Mukimin A., 2006, *Jurnal Pengolahan Limbah Industri Berbasis Logam Dengan Teknologi Elektrokoagulasi Flotasi*, Universitas Diponegoro, Semarang
- Newman, J. S. 1984. *Electrochemical Systems.*, 2nd Edition. Prentice Hall International Inc. New Jersey
- Nugroho R., dan Suyanta, 2016, *Pengolahan Air Kolam Renang Menggunakan Metode Elektrokoagulasi Dengan Elektroda Aluminium – Grafit*, Jurusan Pendidikan Kimia, FMIPA, Universitas Negeri Yogyakarta
- Nurhayati I., Sugito, dan Pertiwi A., 2018. *Pengolahan Limbah Cair Laboratorium dengan Adsorpsi dan Pretreatment Netralisasi dan Koagulasi*, Universitas PGRI Adi Buana, Surabaya
- PERMEN LH Nomor 5 tahun 2014 tentang *Baku Mutu Air Limbah*, (Diakses: Selasa, 5 Nopember 2019, pukul 21.24 WIT), Tersedia di: <http://ditjenpp.kemenkumham.go.id/arsip/bn/2014/bn1815-2014.pdf>
- Ridantami V., Wasito B., dan Prayitno, 2016. *Pengaruh Tegangan Dan Waktu Pada Pengolahan Limbah Radioaktif Uranium dan Thorium Dengan Proses Elektrokoagulasi*, Sekolah Tinggi Teknologi Nuklir-BATAN, Yogyakarta, Indonesia, Pusat Sains Teknologi Akselerator-BATAN, Yogyakarta, Indonesia
- R.S. Luqman, Radinta S., Kholisoh D. S., dan Mahargiani T., 2016, *Penurunan Kadar Krom (Cr) dalam Limbah Cair Industri Penyamakan Kulit dengan Metode Elektrokoagulasi secara Batch*, Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Yogyakarta-55283